

欢迎按以下格式引用:李季,杨蓉慧,王静,等.西部大开发政策动态调整的三方演化博弈及系统仿真分析[J].长江大学学报(社会科学版),2024,47(6):86-96.

西部大开发政策动态调整的三方演化博弈及系统仿真分析

李季 杨蓉慧 王静 张雪婷 李灏南

(兰州财经大学 工商管理学院,甘肃 兰州 730020)

摘要:经济发展伴随资源消耗和环境污染,而生态保护需限制经济活动,两者平衡决定政策的有效性与可持续性。基于演化博弈模型,论文构建了西部经济发展与生态环境保护在西部大开发政策目标下的三方博弈模型,博弈主体包括企业(合规经营/违规经营)、政府(严格监管/松懈监管)和环保组织(积极监督/消极监督)。研究发现:(1)政府严格监管与环保组织积极监督可显著提升企业合规经营概率;(2)降低企业合规成本、增加环保税收优惠及专项补助有助于促使企业策略向合规经营演化;(3)环保资金收回比例达到阈值以上,可推动博弈三方主体最优策略稳定演化。

关键词:西部大开发政策;演化博弈;西部经济;生态环境

分类号:F127.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1673-1395(2024)06-0086-11

一、引言

习近平总书记在2017年十九大报告中首次提出高质量发展的概念,强调经济发展的可持续性、协调性和包容性。这一理念超越了传统的增长逻辑,不仅聚焦于经济效益,更注重环境保护与社会福祉的协调统一。西部大开发政策自2000年实施以来取得了显著成效,通过一系列针对性措施,西部地区的经济和社会水平不断提升。然而,随着我国工业化、城镇化以及西部大开发进程的不断提速,区域间经济发展存在显著差距^[1];并且由于西部地区自然禀赋条件和经济基础相对薄弱,农业经济发展水平普遍较低,生态环境问题也日益凸显^[2],面临着如何实现经济与环境协调发展的双重挑战。如何在促进经济增长的同时实现生态保护,成为亟待解决的双重难题。因此,科学评估西部经济与生态环境

协调发展对推动经济高质量发展与生态环境安全具有重要意义。

关于经济发展与生态环境之间的关系,学者们从多角度进行了探讨,为问题的解决提供了理论和方法论支持,提出了经济与生态环境协调发展的理论框架和研究方法。多数学者采用耦合协调度模型、模糊综合评价法和主成分分析法等定量方法,探讨经济与生态的耦合关系及动态演化趋势。例如,蔡绍洪等(2022)利用熵权法及协调度模型,研究发现城镇化、政府支出、道路建设以及科技创新是影响西部协调发展空间差异的主要驱动因素^[3];唐哲等(2022)通过耦合协调模型分析发现,西部大部分地区的经济发展与生态环境尚处于不协调状态^[4];童思聪(2019)运用改进熵值法和耦合协调度模型,揭示了西部地区生态环境与经济综合演变趋势^[5];柴婧等(2022)基于耦合协调模型,分析了高质

收稿日期:2024-09-10

基金项目:国家社会科学基金项目“西部地区破解经济发展不充分不平衡的动力机制与路径研究”(18BJL085)

第一作者简介:李季(1983-),男,黑龙江佳木斯人,副教授,博士,主要从事企业管理研究。

通信作者:杨蓉慧(2001-),女,甘肃定西人,主要从事企业管理研究,E-mail:2541830490@qq.com。

量发展视角下区域经济与生态环境耦合协调发展的时空演化特性^[6]；程广斌等(2018)在对西北地区经济与生态环境协调度的测算中发现，尽管总体呈现上升趋势，但区域间协调水平存在显著差异^[7]；姚宝珍(2019)通过博弈模型指出制度不互补是导致区域发展不平衡的原因，提出要利用积极的制度激励参与主体在博弈中自主实现合作行为，通过互补制度促进区域协调发展^[8]。

针对生态保护和经济高质量协同发展的研究，学者们主要从高质量发展的内涵与路径出发，分析生态保护和高质量发展的障碍因素，并对相关战略的认知和实现路径进行了探讨。首先，关于高质量发展的内涵与路径，宋洋等(2021)认为，高质量发展的定义会随着经济环境的变化而调整^[9]；张峰(2021)强调，农业高质量发展需要科技创新与市场开放的协同推进^[10]；韩雷等(2021)提出，从经济与社会双层面实施的高质量发展，比单一经济层面的效果更显著^[11]；林珊珊(2022)则强调，在新发展理念的指导下，经济、社会与文化领域需要实现全面协同发展^[12]。此外，国外学者 Jahangir 等(2021)指出，区域开放与贸易自由化有助于区域乃至国家经济高质量发展^[13]；Wang(2022)和 Valickova 等(2021)强调，绿色发展与城市一体化对区域经济的高质量发展起到了积极推动作用，且从区域入手促使国内经济向高质量发展具有重要意义^[14,15]。综上所述，西部地区高质量发展的实现需要绿色生态与经济共同发展，实施西部大开发政策，使西部地区实现高质量发展是多方努力共同促进经济发展，而非单一地从经济活动出发促进经济发展。其次，在分析阻碍因素方面，张贡生(2020)指出，生态环境的脆弱性和经济转型的困难亟需优先解决，区域发展不平衡，经济转型发展存在困难，应优先进行生态保护，促进区域协调，提升可持续发展能力^[16]；杨慧芳等(2022)通过实证分析发现，实现生态与经济协调发展需要优先治理流域的脆弱生态系统^[17]；郝宪印等(2022)进一步强调，水资源是流域发展的刚性约束，解决其不足对推动区域可持续发展至关重要。因此，实现流域的生态保护和高质量发展，需要通过突破生态治理的瓶颈，结合创新发展战略来实现生态与经济的平衡^[18]。另外，在战略认知与路径优化方面，彭绪庶(2022)指出，西部地区高质量发展的价值、需求和意义需要从区域发展战略与绿色循环发展的角度去

分析^[19]；卞科等(2022)提出，沿线高校应为生态保护与高质量协同发展提供科技支持^[20]；任保平(2022)认为，创新驱动和人才活力的释放是推进战略发展的核心^[21]；程永生等(2021)建议，通过加强区域合作、突出流域特色以及优化发展动力系统来实现生态保护与高质量发展的协同^[22]。此外，An 等(2022)认为，生态保护与高质量发展之间存在高度的耦合关系，能够推动经济发展进入良性循环^[23]；Han(2021)和 Liao 等(2019)通过京津冀地区的案例分析，验证了经济高质量发展与生态环境协调的实际价值^[24,25]。综上所述，加深对西部地区生态保护和高质量发展战略的认知，优先保护西部地区生态环境，协同产业创新绿色发展，是实现西部地区生态保护和高质量发展的优化路径。通过文献梳理发现，尽管现有研究取得了一定的进展，但大多以定性分析为主，鲜有针对西部大开发政策动态调整与多方协作机制的系统研究。

本文的研究旨在为解决西部地区生态环境与经济发展之间的矛盾提供理论支持和实践参考，可能的边际贡献在于：(1)结合西部地区的区域特性与生态问题背景，综合考虑政府战略目标与公众参与作用，构建了企业—政府—环保组织的三方演化博弈模型；(2)选择具有现实意义的稳定点进行数值仿真分析，验证模型的有效性，以探讨如何通过多方协同实现西部经济高质量与生态安全协调发展。

二、模型构建

中国西部地区的发展政策既要促进经济增长，又要保护生态环境。随着西部大开发政策的推进，经济与生态环境之间的协调与匹配问题愈发重要。经济发展通常伴随着资源消耗和环境污染，而生态环境的保护需要限制经济活动，这两者之间的平衡又决定了政策的有效性和可持续性。在本研究中，考虑三方主体在演化博弈中的角色：企业、环境保护组织和政府。由于个体认知的局限性和市场信息的不对称性，各主体只能基于“满意”原则而非“最优”原则做出决策，市场参与者做出的决策是有界理性甚至非理性的。本文提出如下研究假设：

假设 H1：企业、环保组织、政府三方主体都是有限理性的经济人。

假设 H2：三方主体的策略集如下：企业的策略集为{合规经营，违规经营}，其中企业选择“遵守规定”的概率为 x ，选择“违规操作”的概率为 $1-x$ 。

企业倾向于通过经济行为最大化自身利益,同时考虑可能的惩罚和监管成本。当企业遵守规定时,它们会完全投资于可持续发展实践;当企业违反规定时,它们可能从事对环境有害的行为以最大化短期利润。政府的策略集为{严格监管,松懈监管},其中严格监管的概率为 y ,松懈监管的概率为 $1 - y$ 。当政府严格监管时,会严格执行环保法规,并对违规经营的企业进行严厉处罚;当政府松懈监管时,法规执行力度不足,处罚不严。环境保护组织的策略集为{积极监督,消极监督},其中积极监督的概率为 z ,被动监督的概率为 $1 - z$ 。当环境保护组织积极监督时,它们会投入更多资源进行环境监督和实施惩罚;当它们消极监督时,监督和实施惩罚的力度较弱。

假设 H3:各主体的收益函数受到其策略选择以及其他主体策略选择的影响。例如,企业的收益函数不仅取决于其自身是否遵守规定,还取决于环境保护组织的监督力度和政府的执法力度。环境保护组织和政府的收益函数也类似。如果企业选择违规经营且被发现,由政府 and 环保组织共同发现的概率为 yz ,企业将面临一定的惩罚。这种惩罚包括被政府处罚的罚款和环保组织提出的诉讼成本。

假设 H4:政府选择“严格监管”时,所需的监管成本为 L 。如果政府选择“松散监管”,则监管成本为 T ,其中 $L > T$ 。环保组织选择“积极监督”时,监督成本为 V 。如果选择“形式监督”,监督成本为 G ,其中 $V > G$ 。

假设 H5:企业在不同策略下的期望收益取决于违规经营的收益 U_{E2} 、合规经营的收益 U_{E1} ,受到惩罚的金额 $(F + S)$ 以及受到惩罚的成本。具体收益如下:选择“合规经营”的企业收益为 U_{E1} 。选择“违规经营”的企业若未被发现,则收益为 U_{E2} 。若违规操作被发现,企业需支付罚款和受到惩罚的成本,净收益为 $(U_{E2} - F - S)$ 。

假设 H6:环保组织和政府的监管和监督行为不仅仅考虑成本,还包括潜在的收益。政府如果成功发现企业的违规行为,选择严格监管时,可以获得额外的直接受益或经济收益,定义为 J 。环保组织选择积极监督成功时获得的收益为 D 。

假设 H7:在长期的博弈过程中,企业、环保组织和政府的策略会逐步趋向于一个动态平衡点,即三方在监管、监督和经营之间达成相对稳定的策略选择组合。

基于上述假设,本研究将构建一个三方演化博弈模型,通过模拟和分析不同策略组合下的演化稳

定策略(ESS),探讨经济发展和生态环境对西部大开发政策的影响。

本文将相关参数及说明汇总至表 1。

表 1 参数及说明

参数	说明
x	企业选择合规经营的概率
y	政府选择严格监管的概率
z	环保组织选择积极监督的概率
U_{E1}	企业选择合规经营时的期望收益
U_{E2}	企业选择违规经营时的期望收益
U_E	企业的平均期望收益
P_h	企业合规经营时的高收益
P_v	企业违规经营时的高收益
C_{ge}	企业合规经营的成本
C_{gb}	企业违规经营的成本
F	政府对企业违规经营行为的罚款
S	环保组织对企业违规经营行为的惩罚
U_{G1}	政府选择严格监管时的期望收益
U_{G2}	政府选择松懈监管时的期望收益
U_G	政府的平均期望收益
M	政府严格监管时的固定收益
L	政府严格监管的成本
Q	政府对企业的补贴
U_{01}	环保组织者选择积极监督的期望收益
U_{02}	环保组织者选择消极监督的期望收益
U_O	环保组织者的平均期望收益
O	环保组织的固定成本
T	政府松懈监管时的行政成本
W	企业违规操作时对社会负面影响
V	环保组织选择积极监督时的成本
R	政府奖励环保组织积极监督的收益
p_1	政府对环保组织监督力度的奖励系数
D	环保组织选择积极监督企业的收益
b	政府对环保组织监督行为的影响权重
a	企业对环保监督的应对成本
J	政府选择严格监管时的直接收益
G	环保组织选择形式监督的成本

资料来源:作者整理。下同。

根据以上分析,研究构建三方收益矩阵如表 2 所示。

三、模型分析

演化博弈模型是一种研究个体在动态环境中策略演化规律的重要工具,尤其适用于分析多方博弈中各方策略的动态调整过程及其稳定性。通过构建企业、政府和环保组织三方之间的博弈模型,可以深

人探讨各方在利益驱动和外部约束下的策略演化路径及长期稳定状态。以下首先对企业策略的复制动态方程及其稳定性进行分析,为理解企业在不同环境约束条件下的策略选择提供理论支持。

表 2 三方收益矩阵

企业(x)	环保组织者(z)	政府(y)	企业收益	环保组织者收益	政府收益
合规经营(x)	积极监督(z)	严格监管(y)	$P_h - C_{ge}$	$D - O$	$M + bK - L$
合规经营(x)	消极监督($1 - z$)	严格监管(y)	$P_h - C_{ge}$	$G - T$	$M + bK - L - V$
违规经营($1 - x$)	积极监督(z)	严格监管(y)	$P_v - C_{gk} - F - S$	$D - O + S$	$M + bK + p_1Q - L - K$
违规经营($1 - x$)	消极监督($1 - z$)	严格监管(y)	$P_v - C_{gk} - F$	$G + H - T$	$M + bK - L - K - V$
合规经营(x)	积极监督(z)	松懈监管($1 - y$)	$P_h - C_{ge}$	$D - O$	$T - R$
合规经营(x)	消极监督($1 - z$)	松懈监管($1 - y$)	$P_h - C_{ge}$	$G - T$	$T - R - V$
违规经营($1 - x$)	积极监督(z)	松懈监管($1 - y$)	$P_v - C_{ge} - F$	$D - O + S$	$T + S$
违规经营($1 - x$)	消极监督($1 - z$)	松懈监管($1 - y$)	$P_v - C_{ge} - F - S$	$G + H - T$	$T + S - V$

(一)企业策略的复制动态方程与稳定性分析
假设企业选择合规经营的期望收益为 U_{E1} ,企业选择违规操作的期望收益为 U_{E2} ,企业的平均期望收益为 U_E :

$$U_{E1}=yz(P_h-C_{ge})+y(1-z)(P_v-C_{gk})+(1-y)z(P_v-C_{ge})+(1-y)(1-z)(P_v-C_{gk})$$

(1)

$$U_{E1}=yz(P_h-C_{ge}-F-S)+y(1-z)(P_h-C_{gk}-F)+(1-y)z(P_v-C_{ge}-F-S)+(1-y)(1-z)(P_v-C_{gk}-F)$$

(2)

$$U_E=xU_{E1}+(1-x)U_{E2}$$

(3)

根据马尔萨斯方程,得到企业策略的复制动态方程为:

$$F(x)=\frac{dx}{dt}=x(1-x)(U_{E1}-U_{E2})$$

(4)

将上述公式展开并代入相应的参数;

$$F(x)=\frac{dx}{dt}=x(1-x)[yz(P_h-C_{ge})+y(1-z)(P_v-C_{gk})+(1-y)z(P_v-C_{ge})+(1-y)(1-z)(P_v-C_{gk})-yz(P_h-C_{ge}-F-S)-y(1-z)(P_h-C_{gk}-F)-(1-y)z(P_v-C_{ge}-F-S)-(1-y)(1-z)(P_v-C_{gk}-F)]$$

(5)

为了达到稳定性,复制动态方程必须满足 $F(x)=0$ 和 $\frac{dF(x)}{dx}<0$,稳定点为 x^* 时满足条件:

$$x^*=\frac{(M+bK-bO+Dy-Kr+p_1Q-Sy-bKy+bQy+bSy)}{(Ly+Ny-L)}$$

(6)

当 $x<x^*$ 时,企业选择违规操作的概率逐渐减少,反之则增加。

(二)政府策略演化博弈稳定性分析

假设政府选择严格监管的期望收益为 U_{G1} ,选择松懈监管的期望收益为 U_{G2} ,政府的平均收益为 U_G :

$$U_{E1}=xz(R_h-C_{g1})+x(1-z)(R_h-C_{g2})+(1-x)z(R_v-C_{g1})+(1-x)(1-z)(R_v-C_{g2})$$

(7)

$$U_{E1}=xz(R_h-C_{g1}-P)+x(1-z)(R_h-C_{g2}-P)+(1-x)z(R_v-C_{g1}-P)+(1-x)(1-z)(R_v-C_{g2}-P)$$

(8)

$$U_G=yU_{G1}+(1-y)U_{G2}$$

(9)

复制动态方程为:

$$F(y)=\frac{dy}{dt}=y(1-y)(U_{G1}-U_{G2})$$

(10)

将方程展开并代入参数,得:

$$F(y)=\frac{dy}{dt}=y(1-y)[xz(R_h-C_{g1})+x(1-z)(R_h-C_{g2})+(1-x)z(R_v-C_{g1})+(1-x)(1-z)(R_v-C_{g2})-xz(R_h-C_{g1}-P)-x(1-z)(R_h-C_{g2}-P)-(1-x)z(R_v-C_{g1}-P)-(1-x)(1-z)(R_v-C_{g2}-P)]$$

(11)

为了达到稳定性,需满足 $F(y)=0$ 以及 $\frac{dF(y)}{dy}<0$,稳定点 y^* 为:

$$y^*=\frac{(A+Bz-C+D)}{(E+Fz-G)}$$

(12)

当 $y<y^*$ 时,政府选择松懈监管的概率逐渐减少,反之则增加。

(三)环保组织者策略演化博弈稳定性分析

假设环保组织者选择积极监督的期望收益为 U_{O1} ,选择消极监督的期望收益为 U_{O2} ,环保组织者的平均期望收益为 U_o :

$$U_{O1}=xy(Q_h-C_{O1})+x(1-y)(Q_h-C_{O2})+(1-x)y(Q_v-C_{O1})+(1-x)(1-y)(Q_v-C_{O2}) \tag{13}$$

$$U_{O2}=xy(Q_h-C_{O1}-T)+x(1-y)(Q_h-C_{O2}-T)+(1-x)y(Q_v-C_{O1}-T)+(1-x)(1-y)(Q_v-C_{O2}-T) \tag{14}$$

$$U_o=zU_{O1}+(1-Z)U_{O2} \tag{15}$$

复制动态方程为:

$$F(z)=\frac{dz}{dt}=z(1-z)(U_{O1}-U_{O2}) \tag{16}$$

将方程展开并代入参数,得:

$$F(z)=\frac{dz}{dt}=z(1-z)[xy(Q_h-C_{O1})+x(1-y)(Q_h-C_{O2})+(1-x)y(Q_v-C_{O1})+(1-x)(1-y)(Q_v-C_{O2})-xy(Q_h-C_{O1}-T)-x(1-y)(Q_h-C_{O2}-T)-(1-x)y(Q_v-C_{O1}-T)-(1-x)(1-y)(Q_v-C_{O2}-T)] \tag{17}$$

为了达到稳定性,需满足 $F(z)=0$ 以及 $\frac{dF(z)}{dt}<0$,稳定点 z^* 为:

$$z^*=\frac{(H+Iz-J+K)}{(L+Mz-N)} \tag{18}$$

当 $z<z^*$ 时,环保组织者选择积极监督的概率逐渐减少,反之则增加。

(四)博弈均衡点与稳定性分析

基于本研究的博弈模型,参与者为企业、政府和环保组织者,三者之间的策略演化可以通过动态方

程进行描述。本文利用雅可比矩阵对各平衡点进行分析,探讨其特征值和稳定性。研究通过 Matlab 求解复制动态方程,得到 10 个均衡点,其中有纯策略均衡点 8 个,分别为: $E_1(0,0,0)$ 、 $E_2(1,0,0)$ 、 $E_3(0,1,0)$ 、 $E_4(1,1,0)$ 、 $E_5(1,0,1)$ 、 $E_6(0,1,1)$ 、 $E_7(1,1,1)$ 、 $E_8(0,0,1)$;第九、第十个均衡点并不是严格意义的纳什均衡,并不符合三方博弈的稳定性标准,因此研究仅对前八个均衡点进行稳定性分析。研究经计算构建雅各比矩阵,并分析各均衡点稳定性(如表 3 所示)。

根据 Lyapunov 判稳第一法可知,局部均衡点为渐进稳定状态的充要条件是系统矩阵中所有特征值的实部均为负数;如果系统矩阵的特征值中有正实部且有负实部,则为鞍点;如果系统矩阵的所有特征值均有正实部,则为不稳定点;若系统矩阵的特征值除了有实部为 0 的特征值之外,还有实部为负数的特征值,则无法判断其稳定状态。首先,利用 Friedman 提出的方法,雅可比矩阵 J 用于判断各方策略演化的稳定性。对于三方博弈,构建三方 Jacobian 矩阵可得:

$$J=\begin{bmatrix} \frac{\partial F_1(x)}{\partial x} & \frac{\partial F_1(x)}{\partial y} & \frac{\partial F_1(x)}{\partial z} \\ \frac{\partial F_2(y)}{\partial x} & \frac{\partial F_2(y)}{\partial y} & \frac{\partial F_2(y)}{\partial z} \\ \frac{\partial F_3(z)}{\partial x} & \frac{\partial F_3(z)}{\partial y} & \frac{\partial F_3(z)}{\partial z} \end{bmatrix} \tag{19}$$

其中, $F_1(x)$ 、 $F_2(y)$ 和 $F_3(z)$ 分别代表企业、政府和环保组织者的策略动态方程。

根据李亚普诺夫稳定性条件,特征值的符号决定了系统的稳定性,若 Jacobian 矩阵所有特征值都为负,则该均衡点为渐进稳定点;若存在任意特征值为正,则该均衡点为不稳定点。通过对三方的演化方程求解,得出以下若干平衡点。在此基础上,我们进一步分析各平衡点的特征值,探讨其局部稳定性。

表 3 Jacobian 矩阵特征值及其稳定性

平衡点	特征值	稳定性分析
$E_1(0,0,0)$	$\lambda_1=C_1-K-aK+aS-Kr,\lambda_2=C_2-H-T,\lambda_3=M+D-bS-P_1Q$	[U,U,+]
$E_2(1,0,0)$	$\lambda_1=H-C_1+T,\lambda_2=F-K+aK-Kr,\lambda_3=M+bK-P_1Q$	[+,U,-]
$E_3(0,1,0)$	$\lambda_1=H-C_2,\lambda_2=S-N+bS+P_1Q,\lambda_3=F-O-aO$	[U,U,+]
$E_4(1,1,0)$	$\lambda_1=C_1-aK-aS+Kr,\lambda_2=H-T,\lambda_3=M-D-bS-P_1Q$	[U,+, -]
$E_5(1,0,1)$	$\lambda_1=C_2-H+T,\lambda_2=S-N+P_1Q,\lambda_3=C_1-aO$	[U,U,-]
$E_6(0,1,1)$	$\lambda_1=F-K+Kr,\lambda_2=C_2-H-aS,\lambda_3=O-aK-P_1Q$	[U,U,+]
$E_7(1,1,1)$	$\lambda_1=H-T,\lambda_2=M-D-bS-P_1Q,\lambda_3=C_1-O-aK$	[U,U,-]
$E_8(0,0,1)$	$\lambda_1=F-K+aS-Kr,\lambda_2=H-T,\lambda_3=M+D-bS-P_1Q$	[U,U,+]

根据表 3 中不同均衡点的特征值和对应的稳定性分析,可以系统地讨论每个稳定点的特性。稳定性分析有助于理解企业、政府、环保组织者在西部大开发政策背景下的演化行为。

对于 $E_1(0,0,0)$ 而言,特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 的符号分析显示 E_1 为不稳定均衡点。企业、政府、环保组织者在策略上都处于非合作状态,该点表现为系统的不稳定性,表明三方未采取任何策略行动,局势无法长期维持。由于所有特征值中至少有一个为正,说明三方博弈在此均衡点下呈现动态失衡,任何外部干预都会导致系统脱离此状态。

对于 $E_2(1,0,0)$ 而言, λ_1, λ_2 表示企业和政府策略的非稳定性,而 λ_3 为负值,表明环保组织者的行动。该均衡点不稳定,企业采取积极策略,但环保组织和政府未参与,系统仍处于不稳定状态。此时企业表现为主动,但环保组织和政府的被动导致该系统无法长期稳定。

对于 $E_3(0,1,0)$ 而言,特征值显示此点下,环保组织者的策略上活跃,企业和政府仍处于消极状态。该点虽然对环保组织有利,但系统整体表现为不稳定。系统会因企业和政府的无为而变得失衡,难以形成有效的博弈状态。

对于 $E_4(1,1,0)$ 而言,所有特征值的符号组合显示企业和环保组织都积极参与博弈,政府未采取有效措施。该均衡点具有部分稳定性。该系统稳定性较高,企业和环保组织者的合作较为紧密,只有政府的无为导致整体系统仍有不稳定因素。

对于 $E_5(1,0,1)$ 而言,企业和政府积极参与,而环保组织处于被动状态。系统部分稳定,但由于环保组织者的不参与,可能存在环境治理的缺口。此均衡点表现为政府与企业之间的合作,但环保政策缺乏相应跟进,导致该博弈系统仍存在隐患。

对于 $E_6(0,1,1)$ 而言,政府与环保组织积极行动,企业处于观望状态。该均衡点相对稳定,但企业未积极参与,经济效益的达成可能较慢。该均衡点表明在政府和环保组织的协同作用下,环保政策可能推进顺利,但经济政策的滞后性可能导致整体系统效益降低。

对于 $E_7(1,1,1)$ 而言,该均衡点下,三方博弈均处于合作状态,特征值组合表示为部分稳定。三方的积极参与使得该均衡点具有较高的稳定性。此均衡点是最理想的博弈结果,三方策略的协同合作能够确保系统的长期稳定。

对于 $E_8(0,0,1)$ 而言,政府积极采取行动,但企

业和环保组织处于消极状态。此点表现为不稳定。由于企业和环保组织缺乏参与,单靠政府的行动难以实现整体的环境与经济协调。由上表可知:存在正特征值,因此为不稳定点, $E_5(1,0,1), E_7(1,1,1)$ 为有条件的稳定点,当且仅当在点 $E_7(1,1,1)$ 处实现了“企业合规经营”“政府严格监管”“环保组织积极监管”三方合力,下面针对有条件的稳定点 $E_5(1,0,1)$ 和 $E_7(1,1,1)$,对博弈系统中企业、政府和环保组织进行展开分析:

对点 $E_5(1,0,1)$ 而言,当满足条件: $\lambda_1 = C_2 - H + T < 0, \lambda_2 = S - N + P_1Q < 0$ 时,该点为渐进稳定点,因此当企业违规经营后面临的损失及来自环保组织者的处罚较大,而政府奖励环保组织积极监督时可获得的收益比例较小时,企业会选择合规经营;当政府松懈监督时环保组织者的积极监督行为较少而其监督失效时的声誉损失较高时,政府更倾向于选择松懈监督。对点 $E_7(1,1,1)$ 而言,当满足条件: $\lambda_1 = H - T < 0, \lambda_2 = M - D - bS - P_1Q < 0$ 时该点为渐进稳定点,因此当企业违规经营后带来的额外成本损失及董事会、监事会给予其的惩罚较大时,经理人会选择合规经营;当政府松懈监管时的行政成本较大,而其政府选择严格监管时的直接收益较高时,政府会选择严格监管。

在西部大开发政策动态调整的背景下,三方参与者(企业、政府、环保组织)的策略演化表现为多个均衡点,其中以均衡点 $E_7(1,1,1)$ 为最理想的博弈状态。其他均衡点显示了单方或两方参与的结果,表现出不同程度的稳定性和不稳定性。这表明三方在实际博弈过程中需要加强合作,尤其是企业和环保组织者的策略协调至关重要。

四、数值仿真分析

为了进一步分析企业、政府、环保组织者在西部大开发政策动态调整背景下的行为模式,更加直观地体现均衡点在各个参数影响下的变动情况,结合实际情况进行参数赋值,利用数值仿真软件 Metlab2024a 进行仿真模拟。

在西部大开发政策正式实施之前,政府着手对区域内的经济发展和生态保护进行协调。在 2015 年,政府首先在西部地区开展了经济和环境综合督查试点工作,截至 2016 年,督查组在督查过程中与当地企业和环保组织进行了多次沟通与协商,约谈企业负责人 65 人,通报批评 60 家企业,追究责任 366 人,督查工作取得了显著成效。由于西部地区

历史上发展方式粗犷,资源型产业集中,生态环境问题相对突出,因此选择该区域污染监管相关数据进行参数设置与仿真分析显得尤为重要。此次督查不仅是对企业的管理和约束,更是通过政府与环保组织的合作,共同推动区域经济的可持续发展。在这一过程中,企业、政府与环保组织之间的博弈和协作将对西部大开发政策的实施产生深远影响。

(一)初始参数设置说明

1. 博弈参与者的成本仿真参数

根据《中国环境年鉴 2020》中“生态环境部部门预算”为环保组织实施监督策略时的成本 C_1 赋值。2019 年我国已经实施新环保法,并且开始征收环境保护税,所以使用《中国统计年鉴 2020》中的“西部地区节能环保支出”为地方政府实施严格监管策略的成本 C_2 赋值。2015 年我国还未实施新环保法,所以使用《中国统计年鉴 2016》中的“西部地区节能环保支出”为地方政府实施宽松监管策略的成本 C_3 赋值。

2. 博弈参与者收益与损失的仿真参数

《中国统计年鉴 2016》中“规模以上工业企业利润总额”,根据比例计算得企业不实施违规经营的收益 $U_{E2}=92$ 。《中国统计年鉴 2020》中“规模以上工业企业利润总额”,根据比例测算设置企业减排后的收益 $U_{E2}=84$ 。参考贾舒娴(2017)的参数设置^[26],国家对地方政府的处罚一般以处分或是通报批评的方式进行,很少涉及经济处罚,所以设 $T=0$ 。环保组织者、地方政府以及企业在博弈过程中获得的社会效益与声誉损失为主观性较强的数据,在参考文献参数设置^[26]的基础上,考虑其他参数的量纲确定取值。设环保组织者积极监督时获得的收益 U_{O1} 为 20,地方政府严格监管时获得的收益 U_{G1} 为 5,环保组织不监督时遭受的声誉损失 L_1 为 10,地方政府宽松监管造成的声誉损失 L_2 为 7.5,企业污染排放超标造成时企业声誉损失 L_3 为 5。

(二)初始仿真结果

为了验证演化稳定分析的有效性,研究依据既有文献并结合现实情况对模型赋值如下(数组一): $a=0.2, b=0.2, S=80, O=80, K=150, r=0.4, W=50, J=40, G=30, Q=30, M=20, D=20, N=25, L=30, F=40, V=50, H=30, T=30, E=300$ 。该赋值符合条件: $\lambda_1=C_2-H+T<0, \lambda_2=S-N+P_1Q<0$ 。在上述参数赋值条件下,三方博弈的初始情况仿真结果如图 1(a)所示。由图 1 可知,随着演化迭代次数增加,无论初试值如何,三方最终会演化

至稳定点;图 1 为三方随时间同时演化的结果,由图 1 可知,企业、环保组织和政府三方的策略演化逐渐趋向稳定点 $E_5(1,0,1)$ 。在初始阶段,各方策略较为波动,但随着演化次数的增加,企业的策略(x)稳定在高水平,而环保组织策略(y)和政府策略(z)逐渐趋于中低水平。三方初始策略均为 1,即全部采取最激进的策略。随着时间的推移,企业和政府策略仍有一定的波动,而环保组织策略相对较快趋于稳定。最终三方均演化至较为稳定的点。随时间演化,企业会演化至“合规经营”,政府会演化至“严格监管”,环保组织会演化至“积极监管”。

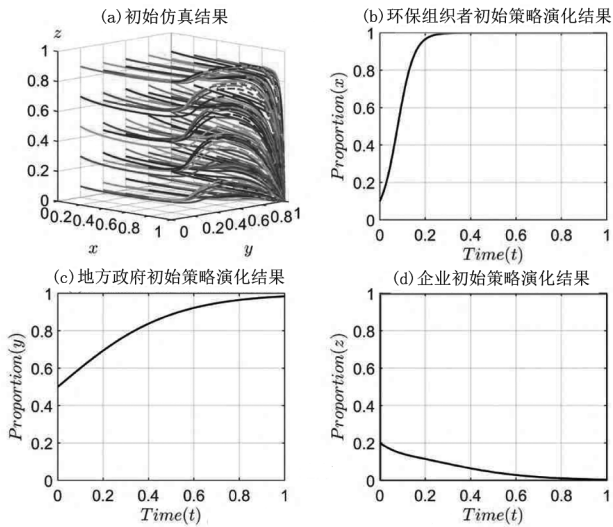


图 1 三方博弈初始仿真结果

(三)博弈均衡点的移动

在得到初始博弈仿真结果的基础上,探究博弈均衡点如何向最优策略点 $E_7(1,1,1)$ 移动。

情况 1:假设部分企业超标排放 50%,则地方政府将按同比例进行罚款处罚,令 $F=1.95$;企业违规经营的成本增加,令 $C_{gk}=1.95$;环保组织对企业污染排放的处罚金额增加,令 $S=2$ 。其他参数保持初始值,在此情况下仿真结果如图 2 所示。

在此情况下,三方博弈的演化稳定点为 $E_7(1,1,1)$,并且满足条件 $\lambda_1=H-T<0, \lambda_2=M-D-bS-P_1Q<0$ 。与初始情况的不同之处在于,当企业选择合规经营策略后的净收益大于实施违规经营前的净收益时,企业会选择实施合规经营策略。对比仿真结果图 1(d)与图 2(d)可以发现,企业的策略演化趋势发生了改变。图 1(d)中企业的策略最终稳定于“合规经营”策略。随着企业排污量增加,地方政府会加大企业污染排放超标罚款,同时通过环保组织会增加监督处罚力度进行罚款,在此情况下,

企业的策略最终稳定于图 2(d)中显示的“合规经营”策略。

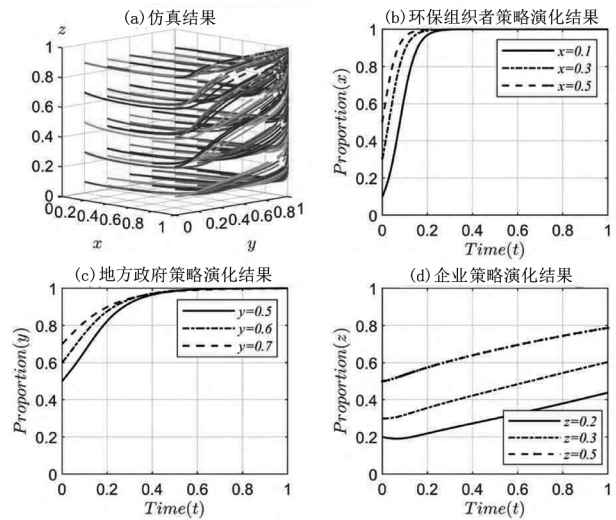


图 2 情况 1 博弈均衡点移动后的仿真结果

情况 2:假设部分企业减排 30%,则地方政府将按同比例进行罚款处罚减少,令 $F=0.9$ 。假设企业实施“合规经营”的额外成本降低,令 $C_{ge}=1.4$;企业选择“合规经营”策略所获得的经营收益增加,令 $P_h=92.4$ 。其他参数保持初始值,在此情况下,三方博弈的仿真结果如图 3 所示。

在此情况下,三方博弈的演化稳定点为 $E_7(1, 1, 1)$,通过对比图 1 与图 3 可以发现,随着环保督察工作的深入与国家对于环保工作的重视程度不断提高,地方政府通过制定税收减免政策等方式鼓励企业控制污染排放,企业也逐渐开始实行“合规经营”策略。在企业实施“合规经营”的额外成本降低、且“合规经营”时经营收益提高的条件下,企业的演化稳定策略会从违规经营策略转变为合规经营策略。对比图 2(d)与图 3(d)可以发现,虽然企业最终都会趋向于选择合规经营策略,但是图 3(d)中企业选择合规经营策略的概率收敛于 1 的速度明显快于图 2(d)。

(四)环保税收优惠率、企业获得的环保专项资金比例、环保专项资金收回比例对系统演化的影响

地方政府可以根据地方的经济、环境状况制定相应的环境保护税政策,通过给予企业一定的税收优惠刺激企业进行合规经营,同时也需要制定环保专项资金管理办法,防止企业滥用环保专项资金。以下依次分析环保税收优惠率 f_1 、企业获得的环保专项资金比例 f_2 以及环保专项资金收回比例 f_3 对系统演化的影响。图 4 展示了环保税收优惠率 f_1 变动对博弈参与者策略选择的影响。博弈参数

设置为 $T=2.5, C_1=3.8, C_2=20, C_3=11.2, R_1=20, R_2=5, R_3=92, R_4=87, L_1=10, L_2=7.5, L_3=5, f_2=1, P_1=0, P_2=0.5, M=10, a=0.3, \Delta_R=8.4, \Delta_L=0.6, C_4=2.8, f_3=0$ 。

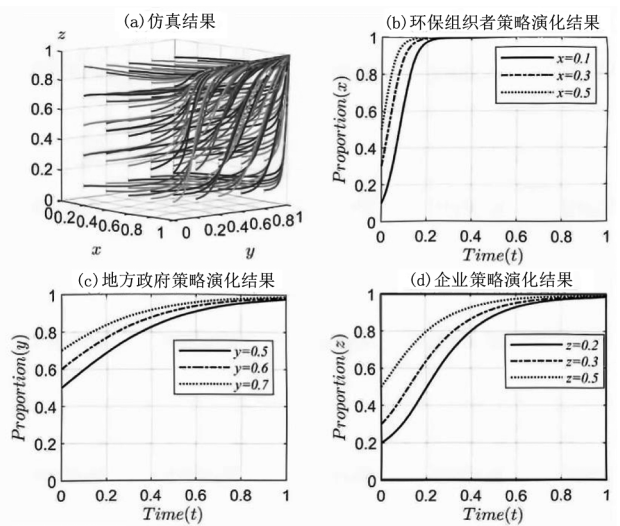


图 3 情况 2 博弈均衡点移动后的仿真结果

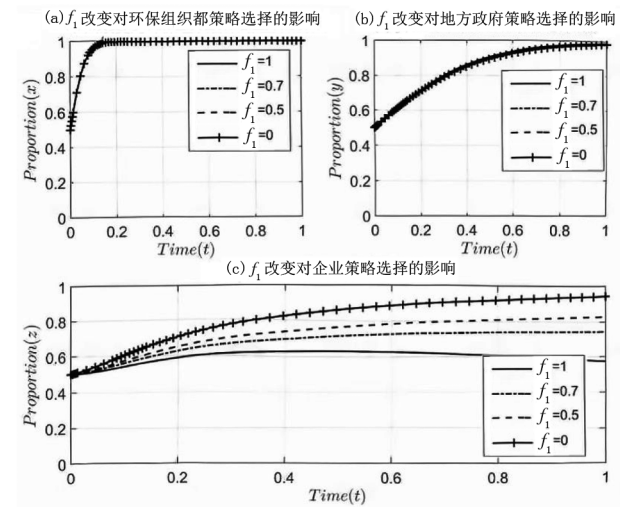


图 4 环保税收优惠率 f_1 的影响

由 4(a)与图 4(b)所示的演化路径可以得知, f_1 值的改变不会影响环保组织与地方政府策略选择。但是从图 4(c)可以看出, f_1 值变化会影响企业的策略选择。当 $f_1=1$,即没有税收优惠时,企业的策略演化趋势先缓慢上升之后又缓慢下降,企业选择合规经营策略的概率最终稳定在 0.6 左右,并且依然处于下降趋势。这说明不实施税收优惠策略会影响企业策略选择,即使企业一开始有进行合规经营的想法,但是由于激励不足,最终还是会选择违规经营策略。随着 f_1 降低,企业的演化结果逐渐向“合规经营”策略靠近,特别是当 $f_1=0$ 时,即地方

政府因为企业污染减排达标而免除了其环境保护税,企业的演化结果收敛于“合规经营”策略的速度最快。由此可见,地方政府在制定合理的环境保护税税率的同时也需要给完成污染减排目标的企业提供一定的环保税收优惠,可以正向激励企业采取环境保护策略,达到提高本地区环境质量的目标。

图 5 展示了企业从当地政府获得的环保专项资金的比例 f_2 变动时三个博弈参与者之间的策略演化情况。参数设置为 $T=5, C_1=3.8, C_2=20, C_3=11.2, R_1=20, R_2=5, R_3=92, R_4=87, L_1=10, L_2=7.5, L_3=5, P_1=0, P_2=0.5, M=10, a=0.3, \Delta_R=8.4, \Delta_L=0.6, C_4=2.8, f_1=1, f_3=0$ 。 f_2 值越高说明企业从地方政府处获得的环保专项资金越多。从图 5(a)与图 5(b)中可以看出, f_2 值的变动并不会影响环保组织者与地方政府最终的策略选择,但是从图 5(b)中可以明显看出, f_2 增加使得地方政府趋向于严格监管的速度减慢,主要原因是地方政府能够使用的环保专项资金减少会导致工作开展的难度加大,从而影响监管效率与监管效果。从图 5(c)中可以看出,随着 f_2 增大,企业的策略选择发生改变。当 f_2 取 0 时,即企业未获得环保专项资金,企业最终会选择实施“违规经营”。随着 f_2 取值提高,例如 f_2 取 0.6 与 1 时,企业选择合规经营策略的概率最终会收敛于 1,且随着 f_2 值的增大,企业选择合规经营策略的概率收敛于 1 的速度也逐渐变快。因此,地方政府需要提高环保专项资金发放比例,切实帮助企业减少实施合规经营策略的成本压力,引导企业从源头治理与技术革新两个角度进行合规经营。

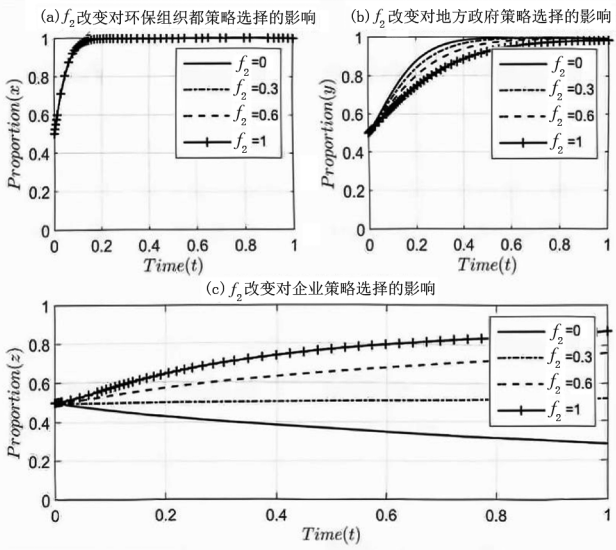


图 5 企业获得的补助资金占环保专项资金的比例 f_2 的影响

图 6 为环保专项资金收回比例 f_3 对三个博弈参与者策略演化过程的影响,参数设置为 $T=5, C_1=3.8, C_2=20, C_3=11.2, R_1=20, R_2=5, R_3=92, R_4=87, L_1=10, L_2=7.5, L_3=5, P_1=0, P_2=0.5, M=10, a=0.3, \Delta_R=8.4, \Delta_L=0.6, C_4=2.8, f_1=1, f_2=1$ 。

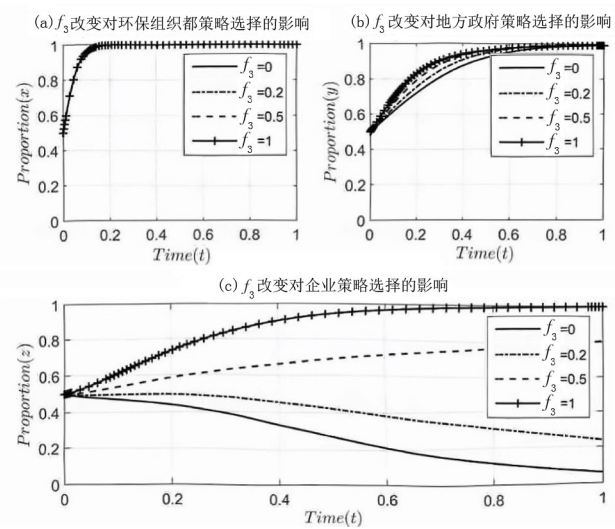


图 6 环保专项资金收回比例 f_3 的影响

通过观察图 6(a)与图 6(b)可以看出, f_3 的提高对于环保组织者与地方政府的策略演化结果并没有影响,但在一定程度上使地方政府选择严格监管比例收敛于 1 的速度变慢。从图 6(c)中可以看出,随着 f_3 值的提高企业的策略选择也发生改变。当 $f_3=0$ 与 $f_3=0.2$ 时,即不实施环保专项资金回收策略,以及超标排放收回比例较低时,企业依然会选择违规经营策略。当 f_3 提高时,即地方政府加大对企业违规经营的处罚力度,企业的策略发生转变,从选择“违规经营”策略转变为趋向于“合规经营”策略。随着 f_3 值的增大,企业选择合规经营策略的概率趋向于 1 的速度增快。当 f_3 的取值提高到 0.5 时,收回措施才发挥出应有的效果。因此地方政府在获得环保专项资金后,还需要制定合理的环保专项资金管理办法,才能充分发挥环保专项资金的激励作用,促进企业合规经营,实现生态环境的可持续发展。

五、结论与建议

(一)研究结论

本研究基于演化博弈论,构建了环保组织者、地方政府与企业之间的三方演化博弈模型,通过 Lyapunov 判稳第一法分析了模型的稳定性,并利用实际数值进

行仿真,分析了三个博弈参与者的策略演化过程与影响因素,最终得出研究结论:

第一,模型有两个稳定点, $E_5(1,0,1)$ 为博弈的初始演化稳定点,此时三方的策略选择为企业“合规经营”、政府“积极监督”、环保组织者“形式监管”; $E_7(1,1,1)$ 为博弈的最佳演化稳定点,此时三方的策略选择为企业“合规经营”、政府“严格监督”、环保组织者“积极监管”。企业、政府和环保组织作为有限理性主体,会根据博弈的长期收益与成本进行动态调整。仿真结果表明,三方都倾向于短期内寻求自身最大化利益,但随着博弈的持续进行,它们逐步趋向于合作的稳定点。例如,环保组织若长期消极监督,尽管短期内减少成本,但会导致企业违规增加,从而导致长远利益受损。

第二,企业的策略选择直接受政府和环保组织的行为影响。当政府严格监管和环保组织积极监督的概率较高时,企业选择合规经营的概率也会增加,仿真显示此时企业的违规成本显著增加,促使其向可持续发展策略转变。反之,政府松懈监管或环保组织消极监督时,企业更倾向于违规经营。

第三,主体的收益函数三方主体的收益函数互相影响,政府和环保组织的监督和执法会影响企业的收益。政府选择严格监管的收益不仅仅在于罚款收益,也包括通过提升企业合规率获得的长期社会效益。仿真显示,当政府和环保组织严格监督,企业违规的收益会被大大削弱,迫使企业选择更高的合规率。

第四,政府和环保组织面临监管和监督的成本压力,仿真分析结果显示当成本过高时,双方更倾向于选择低成本的松懈监管与消极监督,导致企业违规行为增加。因此,平衡政府和环保组织的监管监督成本,尤其是通过提升技术手段降低成本,是博弈中稳定策略的关键。

第五,企业在违规经营和合规经营间的期望收益差异是其策略选择的关键。仿真分析结果表明,随着政府加大罚款以及环保组织的法律诉讼成本增加,企业的违规收益将明显下降,合规经营的收益会占据优势,逐渐引导企业向可持续发展方向调整。

第六,政府和环保组织不仅考虑监督成本,还需衡量监管成功的收益。仿真表明,当成功发现企业违规行为的收益较高时(例如通过罚款或国际声誉提升),政府和环保组织更有动力选择严格监管与积极监督,从而进一步提高整个博弈系统的稳定性。

第七,长期博弈过程中,三方的策略会趋向于动

态平衡点。在严格监管和积极监督的情况下,三方逐渐趋于合规经营、严格监管和积极监督的稳定策略组合。仿真分析结果进一步验证了这一点:当政府和环保组织在博弈中持续提高其监管力度时,企业合规的稳定策略逐步形成。

第八,提高环保专项资金收回比例,会提高地方政府收敛于实施严格监管策略的速度,当收回比例超过一定临界值,会促使企业转向实施合规经营策略。地方政府为企业提供税收优惠可以激励企业减少污染排放,但只有当优惠程度超过一定临界值时企业才会实施合规经营策略。提高企业从地方政府处获得的环保专项资金比例,虽然会减缓地方政府收敛于严格监管的速度,但是可以减轻企业实施合规经营的经济压力,进而促使企业选择实施合规经营策略。

(二)研究建议

第一,加强政策引导,推动绿色发展。习近平总书记曾强调“绿水青山就是金山银山”,这要求政府在执行环保政策时不断强化动态调整机制。政府应根据企业和环保组织的反馈,灵活调整监管政策,保证监管力度的可持续性。例如,建立差异化监管机制,针对不同规模的企业和行业进行针对性干预,以平衡监管成本与效益。政府也应该加强绿色环保政策的实施力度,并对转型企业给予更大力度的奖励措施。习近平总书记曾强调绿色发展是实现可持续发展的关键,政府需通过税收优惠、补贴等政策推动企业进行绿色转型。同时,加强对不遵守环保标准企业的处罚力度,以遏制其短期利益行为。政府更应该结合企业的反馈和环保组织的监督信息,建立灵活的政策调整机制。政策不应一刀切,需针对不同区域、行业和企业制定差异化措施,实现精准调控。同时要加强对地方政府的问责机制,确保政策的落地与执行效果。

第二,提升环保组织的社会监督力度。环保组织的监督不仅在于环境保护,还肩负社会责任。仿真分析结果显示,积极的社会监督可以有效抑制企业违规行为。因此,环保组织应充分利用媒体、公众舆论等社会监督工具,提升其影响力。通过组织环保活动和发布报告,环保组织可将公众的关注度引向企业的环境保护行为,倒逼企业实施环保政策。政府应为环保组织提供更多的信息公开支持,增加其透明度和社会参与感。环保组织也应该利用现代科技手段,如大数据和区块链技术,提升监督效率,降低监督成本。

第三,构建企业绿色发展激励机制。政府可以通过绿色税收优惠、环保补贴和社会宣传等多种方式,构建长期有效的企业绿色激励机制,提升企业自觉转型的积极性。这包括为实施绿色技术和节能减排的企业提供税收优惠和创新奖励,并对绿色环保领先企业进行宣传和表彰,形成正面激励效应。这样能够推动企业绿色发展与社会效益并行。仿真结果表明,当企业看到合规经营的长期收益高于违规成本时,它们会主动选择绿色转型。通过绿色金融支持,推动企业加大环保技术的研发投入,提升绿色竞争力。

第四,创新环保监管技术,降低监管成本。习近平总书记强调“创新是引领发展的第一动力”,因此,政府应通过推动绿色技术研发和创新,提升企业的核心竞争力。可以设立专项资金,支持企业与高校、科研机构的合作,推动关键技术的突破,最终实现经济效益与环境保护的双赢。在面对较高的监管成本时,政府和环保组织可以通过创新监管技术,降低执法与监督的成本。例如,利用智能监控系统和无人机技术进行实时环境监测,不仅可以降低成本,还能提高发现违规行为的效率,从而提升政府和环保组织的收益。

基于以上建议,企业、政府和环保组织可以在三方博弈中找到平衡点,共同推动西部地区的绿色可持续发展。

参考文献:

[1]陈洪章,曾冰,郭虹.黄河流域县域经济时空分异及影响因素——来自夜间灯光数据的检验[J].经济地理,2022(11).

[2]薛澜,杨越,陈玲,等.黄河流域生态保护和高质量发展战略立法的策略[J].中国人口·资源与环境,2020(12).

[3]蔡绍洪,谷城,张再杰.西部经济与生态环境协调发展的时空特征研究——基于高质量发展视角[J].生态经济,2022(11).

[4]唐哲,魏修建.西南地区产业结构升级与生态环境耦合协调发展研究[J].西藏大学学报(社会科学版),2022(2).

[5]童思聪.西部地区经济发展与生态环境耦合协调度分析[J].上海节能,2019(7).

[6]柴婧,苏向辉,马瑛,等.高质量发展视角下区域经济与生态环境耦合协调研究——以山西省及其下辖地市为例[J].江西农业学报,2022(10).

[7]程广斌,陈曦,蓝庆新.丝绸之路经济带中国西北地区经济发展与生态环境耦合协调度分析——基于 DEA-熵权 TOPSIS 模型的实证研究[J].国际商务(对外经济贸易大学学报),2018(5).

[8]姚宝珍.博弈视角下区域协调发展的制度困境及其创新路

径——以制度互补理论为基础[J].城市发展研究,2019(6).

[9]宋洋,李先军.新发展格局下经济高质量发展的理论内涵与评价体系[J].贵州社会科学,2021(11).

[10]张峰.长三角农业高质量一体化发展评价研究[J].中国农业资源与区划,2021(1).

[11]韩雷,钟静美.高质量发展的内涵解读、理论框架及实现路径[J].湘潭大学学报(哲学社会科学版),2021(6).

[12]林珊珊,徐康宁.中国高质量发展的测度评价:地区差异与动态演进[J].现代经济探讨,2022(2).

[13]Jahanger A.Influence of FDI characteristics on high-quality development of China's economy[J].Environmental Science and Pollution Research,2021(28).

[14]Wang Z.,Zhang X.,Zhang C.,et al.How regional integration affects urban green development efficiency: Evidence from urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River[J].International Journal of Environmental Research and Public Health,2022(13).

[15]Valickova P.,Eims N.Potential gains from integration to reduce costs of electricity supply and access in Southern Africa[J].Energy for Sustainable Development,2021(3).

[16]张贡生.黄河流域生态保护和高质量发展:内涵与路径[J].哈尔滨工业大学学报(社会科学版),2020(5).

[17]杨慧芳,张合林.黄河流域生态保护与经济高质量发展耦合协调关系评价[J].统计与决策,2022(11).

[18]郝宪印,邵帅.黄河流域生态保护和高质量发展的驱动逻辑与实现路径[J].山东社会科学,2022(1).

[19]彭绪庶.黄河流域生态保护和高质量发展:战略认知与战略取向[J].生态经济,2022(1).

[20]卞科,汪来喜,罗志远.河南省高校服务黄河流域高质量发展政策支持体系的重要性及目标取向研究[J].经济研究导刊,2022(13).

[21]任保平.黄河流域生态保护和高质量发展的创新驱动战略及其实现路径[J].宁夏社会科学,2022(3).

[22]程永生,张德元,赵梦婵.黄河流域生态保护和高质量发展的时空演变与驱动因素[J].经济体制改革,2021(5).

[23]An S.,Zhang S.,Hou H.,et al.Coupling coordination analysis of the ecology and economy in the Yellow River basin under the background of high-quality development[J].Land,2022(8).

[24]Han H.,Gou L.,Zhang J.,et al.Spatiotemporal analysis of the coordination of economic development,resource utilization,and environmental quality in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration[J].Ecological Indicators,2021(8).

[25]Liao M. L.,Chen L.,Wang Y. J.,et al.Study on the coupling and coordination degree of high-quality economic development and ecological environment in Beijing-Tianjin-Hebei region[J].Applied Ecology and Environmental Research,2019(5).

[26]贾舒娟,黄健柏,钟美瑞.生态文明体制构建下的金属矿产开发生态补偿利益均衡研究[J].中国管理科学,2017(12).

责任编辑 刘玉成 E-mail:770533213@qq.com